

국내풍속보정에 적합한 Deacon 방정식의 기하평균높이 산정방법에 대한 연구

정의현*, 문채주**, 정문선***, 조규판****, 박귀열*****

*목포대학교 대학원 전기공학과(swat9310@paran.com), **목포대학교 공과대학 전기공학과(cjmoon@mokpo.ac.kr),
목포대학교 대학원 전기공학과(suny3124@nate.com), *목포대학교 대학원 전기공학과(jokyupan@nate.com),
*****목포대학교 대학원 전기공학과(wowsuper@nate.com)

The study for calculating the geometric average height of Deacon equation suitable to the domestic wind correction methodology.

Cheang, Eui-Heang* Moon, Chae-Joo** Jeong, Moon-seon*** Jo, Kyu-Pan**** Park, Gui-Yeol*****

*Dept. of Electrical Engineering, Mokpo National University(swat9310@paran.com),
**Dept. of Electrical Engineering, Mokpo National University(cjmoon@mokpo.ac.kr),
***Dept. of Electrical Engineering, Mokpo National University(suny3124@nate.com),
****Dept. of Electrical Engineering, Mokpo National University(jokyupan@nate.com),
*****Dept. of Electrical Engineering, Mokpo National University(wowsuper@nate.com)

Abstract

The main cause of global warming is carbon dioxide generated from the use of fossil fuels, and active research on the reduction of carbon is in progress to slow down the increasing global warming. Wind turbines generate electricity from kinetic energy of wind and are considered as representative for an energy source that helps to reduce carbon emission. Since the kinetic energy of wind is proportional to the cube of the wind speed, the intensity of wind affects wind farm construction validity the most. Therefore, to organize a wind farm, validity analysis should be conducted first through measurement of the wind resources. To facilitate the approval and permission and reduce installation cost, measuring sensors should be installed at locations below the actual wind turbine hub. Wind conditions change in shape with air density, and air density is most affected by the variables terrain and surface type. So the magnitude of wind speed depends on the ground altitude. If wind conditions are measured at a location below the wind turbine hub, the wind speed has to be extrapolated to the hub height. This correction of wind speed according to height is done with the Deacon equation used in the statistical analysis of previously observed data. In this study, the optimal Deacon equation parameter was obtained through the analysis of the correction of the wind speed error with the Deacon equation based on the characteristics of terrain.

Keywords : Deacon 방정식(Deacon equation), 연직분포(Vertical distribution), 위트시어(Wind shear), 풍력자원 분석(Wind Resource Analysis), 기하평균고도(geometric average height), 풍속할증(Wind extra)

투고일자 : 2010년 3월 31일, 심사일자 : 2010년 4월 10일, 게재확정일자 : 2010년 7월 12일
교신저자 : 문채주(cjmoon@mokpo.ac.kr)

1. 서 론

지구온난화의 주된 이유가 이산화탄소와 같은 인간의 활동으로 생산되는 물질로 지목되었으며, 이 물질들을 줄이기 위해 탄소 저감운동의 필요성이 대두되고 있다.^[1] 특히 국내 전력 생산량의 40% 이상이 탄소를 발생시키는 화석연료가 사용되어 이산화탄소를 감축시키는 풍력발전과 같은 신재생에너지에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 특히 풍력발전은 풍속의 세제곱에 비례하여 출력이 얻어지므로 풍황자원의 분포가 풍력발전단지 건설의 타당성조사에 가장 큰 영향을 미친다. 풍력발전량분석을 위해서 풍황의 측정과 주변지역의 통계적인 보정이 이루어지는 것이 일반적이며, 지형과 지면조도 이외에도 상대습도 기압, 지구 자전, 태양복사열 등이 풍속높이 보정 변수로 알려져 있다. 하지만 이 모든 변수의 측정과 적용이 어려워 풍력발전 타당성조사에서는 풍황을 장기간 조사하고 측정된 지역 10km 이내의 근거리의 지형과 지면조도를 고려하여 추정하고 있다. 즉, 측정된 풍황을 기준으로 지형과 지면조도의 관계를 반영하여 풍력에너지 분포를 추정한다.

풍력발전기의 허브높이는 2MW 기준으로 80m 내외이며, 풍력발전량은 풍력발전기의 허브 높이를 기준으로 추정해야 한다. 허브 높이에서 풍황의 측정은 인허가, 경제적인 문제가 부각되어 이보다 낮은 높이에서 풍황을 측정한다. 허브보다 낮은 높이의 측정은 80m 높이 풍속보정이 반드시 필요하며, 기존에 연구된 Deacon 방정식을 사용하고 있다.

본 연구에서는 지형의 특성에 따른 Deacon 보정 풍속의 오차를 분석하여 최소화하기 위한 방안을 확인하고자 한다.

2. 풍속높이 보정

지면에서 고도가 높아질수록 밀도가 낮아

지는 반면 풍속은 높아진다. 풍속과 높이의 관계는 측정된 데이터를 통계학적으로 분석한 결과 대수법칙을 따르며, Deacon 방정식으로 정립되어 있다. Deacon 방정식은 대기의 안정도(Wind shear: α)에 따라 할증 정도를 표현한 것으로 식(1)과 같다.^[2]

$$U(z) = U(z_a) \times \left(\frac{Z}{Z_a} \right)^\alpha \quad \text{식(1)}$$

여기서 Z , $U(z)$ 는 Z 높이와 Z 높이에서의 풍속이고, Z_a , $U(z_a)$ 는 Z_a 높이와 Z_a 높이에서의 풍속이다. 또한, α 는 대기안정도를 나타내는 척도로써, wind shear 혹은 풍속할증계수라고 한다. Deacon 방정식에 따르면 풍속할증계수는 지형의 변화(계측지점을 기준으로 기하평균높이)와 지면조도(Roughness)에 의해서 결정되며 이를 식으로 나타내면 식(2)와 같다.^[2]

$$\alpha = a + b \ln(U(z))$$

$$a = \frac{1}{\ln\left(\frac{Z_g}{Z_o}\right)} + \frac{0.088}{1 - 0.088 \ln\left(\frac{Z_a}{10}\right)} \quad \text{식(2)}$$

$$b = \frac{-0.088}{1 - 0.088 \ln\left(\frac{Z_a}{10}\right)}$$

여기서, Z_g 는 기하평균높이, Z_o 는 지면거칠기(지면조도), Z_a 는 풍속측정높이이다. 기하평균높이는 해발고도의 기하평균으로써, Met mast 고도에서 표본점 고도의 할증에 대한 기하평균 산출방법은 식(3)과 같다.

$$\sqrt[n]{a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot \dots \cdot a_n} = \prod_{i=1}^n a_i \quad \text{식(3)}$$

여기서, n 은 표본점의 개수이며 a 는 표본점과 측정지점의 할증이다.

식(2)에 따르면 풍속이 클수록 지면으로부터

터 wind shear가 낮아지며, 지형의 기하평균 높이가 높을수록 지면으로부터 wind shear가 낮아지며, 지면조도가 높을수록 지면으로부터 wind shear가 높아진다.

또한, 측정지점이 같고 높이가 다른 2개소 이상의 풍속이 측정되었을 경우 식(1)을 먹에 대한 외삽법칙으로 연립하면 식(4)와 같이 wind shear산출이 가능하다.

$$\alpha = \frac{\ln\left(\frac{U(z)}{U(z_a)}\right)}{\ln\left(\frac{z}{z_a}\right)} \quad \text{식(4)}$$

3. 풍황의 측정 및 측정지형의 특성

3.1 지형의 특성

우리나라의 지형은 평지지역과 복잡지역으로 구분할 수 있으며, 평지지역은 주로 서해지방에 복잡지역은 태백산맥과 같은 산간지방에 분포한다. 때문에 풍속의 연직분포를 평지지역과 복잡지역으로 구분하여 분석하였다. 평지지역은 전남의 해안지방에서 측정된 풍황자원을 표본으로 (가)지역이라 하고 복잡지역은 강원도 미시령인근 지역에서 측정된 풍황자원을 표본으로 (나)지역으로 구분한다.

(1) (가) 지역

(가)지역은 지형의 높낮이가 적은 평지지역으로 국내에서는 서해지방에 집중되어 있으며, 본 연구에서는 최근 해상풍력발전의 거점으로 거론되고 있는 전남지역을 선정하였다. 측정지점은 서방위에서 북동방위로 바다로 이루어져 있으며, 동방위에 약 300m고도의 산이 존재하며, 남방위로는 군소마을이 존재한다.

(2) (나) 지역

(나)지역은 지형의 높낮이가 많고 큰 복잡지형으로 국내에서는 강원도에서 경북지역

에 이르는 태백산맥을 중심으로 이루어져 있으며 본 연구에서는 강원도 내의 670m고도의 지역에 계측된 풍황자원을 기준으로 분석하였다. 서방위로 측정지점의 고도보다 약 200m 더 높은 고도가 존재하며, 남방위로 약 100m 높은 고도가 존재한다. 특히, 북동방위로 약 500m이격된 지점은 200m가량 낮은 고도이며, 1km이격된 지점에 400m 더 높은 고도가 존재하는 계곡형태를 띄고 있다.

3.2 풍황의 측정

풍력의 종류에는 난류와 층류, 해풍과 육풍 등으로 구분되며 이중에 난류와 층류는 공기밀도 차에 의해서 발생하는 와류가 가장 큰 원인으로 지목되고 있다. 특히, 난류에 해당하는 풍속은 지면에서 100m이내의 고도에서 주로 분포하고, 층류는 지면에서 100m이상의 고도에서 주로 분포한다.^[3] 공기밀도차를 발생하는 여러 이유 중에서 풍황에 영향력이 큰 변수는 지면의 상태라고 할 수 있다.

본 연구에 사용된 풍황측정장비는 NRG사에서 제공하는 #40풍속계, #200풍향계를 사용하였으며, 계측은 3초에 한 번씩 측정하여 10분단위로 평균, 표준편차, 최대, 최소 값을 저장하였다. 이때, 풍속계와 풍향계의 설치 높이는 50m, 40m, 30m에 설치되었다.

그림 1은 (가)지역과 (나)지역에 설치된 Met mast 설치전경이다.



그림 1. (가)지역(좌) (나)지역(우)의 Met mast 전경

4. 기하평균고도 산출방법에 의한 연직분포

측정지점에서 16방위로 구분하여 방위별 기하평균고도와 지면조도 등급을 식(2)에 적용하여 16방위별로 Wind shear를 산출한다. 이때, 기하평균고도를 산출하기위해서 각각 기준점으로부터 반경 1km에서 9km까지 2km 간격으로 적용하여 기하평균고도를 산출한다. 산출된 Wind shear와 30m높이에서 측정된 풍속을 식(1)에 적용하여 50m높이의 보정풍속을 산출한다. 센서의 오차 등을 고려하여 30m와 50m에서 측정된 풍속을 식(4)에 적용한 결과 윈드시어 0.2m만의 데이터만을 활용하였다. 이때의 적용 데이터 개수는 (가)지역이 52,650개중 24,816개, (나)지역이 총 52,560개중 52,001개 이다. 30m높이의 평균풍속은 (가)지역이 6.1m/s, (나)지역이 5.7m/s이고, 50m높이의 풍속은 (가)지역이 6.3m/s, (나)지역이 6.1m/s이다.

기하평균이라 함은 기준 값을 기준으로 증가배율에 대한 평균을 나타내는 값으로써, 식(2)에서 적용되는 기하평균 높이는 측정지점을 기준으로 지형의 변화정도가 얼마인지 알 수 있는 척도이다. 국내지형은 원만한 평지라고 하여도 그 변화저도가 매우 다양하므로 기하평균 높이를 산정하는 방법에 따라서 식(2)에 적용되는 기하평균 높이는 다양하다. 본 논문에서는 기하평균높이를 산정하는 최적의 방법을 다음과 같이 제안 한다.

- (1) 16방위로 구분하여 방위별 기하평균 높이를 산정한다.
- (2) Met mast설치지점에서 이격된 기준거리를 구분하여 10개의 표본높이를 통해서 각각 산출된 기하평균높이를 적용한 Deacon 방정식의 Wind-shear와 실측을 통해 산출된 Wind-shear의 오차률을 판단한다.
- (3) 최적의 이격기준거리를 대상으로 이격 기준거리의 20, 10, 5의 표본높이를 통해서 각각 산출된 기하평균높이를 적용한 Deacon 방정식의 Wind-shear와 실측을 통해 산출된 Wind-shear의 오차률을 판단한다.

4.1 (가)지역 Met mast로부터 이격 기준거리의 기하평균높이

풍속의 연직분포는 식(2)와 같이 추정하며, 풍속, 지형의 기하평균높이, 지면조도 측정 높이에 의해서 산출된다. 특히, 지형의 기하평균 높이는 지형의 형태를 나타내는 대표적인 표본이다. Met mast에서 이격기준거리를 1km, 3km, 5km, 7km, 9km,로 구분하여 각각에 이격기준거리의 10거리마다 이격표본을 적용하여 기하평균높이를 산정한 결과는 (가)지역의 기하평균높이는 표 1, (나)지역의 기하평균높이는 표2와 같다.

표 1. (가)지역의 방위별 기준거리에 따른 기하평균높이

방위	Met mast와 기준거리[km]의 기하평균높이				
	1km	3km	5km	7km	9km
N	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
NNE	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
NE	0.02	0.02	0.07	0.30	1.35
ENE	0.02	0.03	0.25	0.91	1.09
E	0.02	0.04	0.21	0.61	1.34
ESE	0.14	0.68	0.68	1.00	1.00
SE	0.68	1.00	1.00	1.37	2.17
SSE	0.68	1.00	1.00	2.18	2.21
S	0.68	1.00	1.00	1.37	1.37
SSW	0.68	1.00	0.68	0.91	1.26
SW	0.68	0.14	0.06	0.04	0.03
WSW	0.06	0.03	0.03	0.03	0.02
W	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
WNW	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
NW	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
NNW	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02

표1에서 표2는 (가)지역과 (나)지역에서 방위별로 산출된 기하평균높이를 식(2)에 적용하여 윈드 시어를 산출하고 산출된 wind shear와 30m높이에서 계측된 풍속을 식(1)에 적용하여 50m 보정풍속을 산출한 결과와 Met mast에서 실측된 50m높이의 풍속을 비교하였다.

(가)지역의 경우 50m높이의 평균실측 풍속이 6.3m/s이고, 1km 이격 기준거리로 산출된 평균 풍속은 7.6m/s, 3km 이격 기준거리로 산출된 평균 풍속은 6.5m/s, 5km 이격 기준거리로 산출된 평균 풍속은 6.9m/s, 7km 이격 기준거리로 산출된 평균 풍속은 5.4m/s, 9km 이격 기준거리로 산출된 평균 풍속은 6.6m/s이다. (가)지역의 방위

별 실측과 보정풍속의 평균은 표 3과 같다.

표 2. (나)지역의 방위별 기준거리에 따른 기하평균높이

방위	Met mast와 기준거리[m]의 기하평균높이				
	1km	3km	5km	7km	9km
N	1.01	1.01	0.97	0.69	0.54
NNE	1.08	0.97	0.86	0.79	0.55
NE	1.13	0.90	0.72	0.56	0.45
ENE	1.21	1.03	0.93	0.81	0.61
E	1.29	1.03	0.65	0.48	0.37
ESE	1.30	1.15	0.97	0.95	0.78
SE	1.31	1.27	1.26	1.31	1.17
SSE	1.23	1.27	1.14	1.11	1.17
S	1.20	1.05	0.96	0.93	1.04
SSW	1.12	1.04	0.89	0.79	0.77
SW	1.02	0.95	0.92	0.95	0.98
WSW	0.96	0.91	0.98	1.04	1.10
W	0.94	0.85	0.94	1.06	0.81
WNW	0.94	0.74	0.75	0.94	1.01
NW	0.97	0.78	0.70	0.77	0.88
NNW	1.00	0.95	0.73	0.77	0.64

표 3. (가)지역 50m 실측풍속과 기준거리별로 산출된 50m 보정풍속

방위	50m 고도의 실측 풍속[m/s]					
	실측	1km	3km	5km	7km	9km
N	3.7	3.9	3.9	3.9	3.9	3.9
NNE	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6
NE	5.5	5.4	5.4	13.8	9.1	5.8
ENE	2.7	2.5	2.6	3.0	2.8	2.7
E	-	-	-	-	-	-
ESE	1.7	2.0	1.9	1.9	1.9	1.9
SE	4.8	4.5	4.5	4.6	4.5	4.5
SSE	6.0	5.6	5.6	5.6	5.5	5.6
S	5.9	5.6	5.6	5.6	5.6	5.7
SSW	5.6	5.7	5.6	5.8	5.7	5.8
SW	-	-	-	-	-	-
WSW	7.9	10.7	8.3	8.7	5.6	8.4
W	5.8	6.1	6.1	6.1	6.1	6.1
WNW	2.4	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3
NW	4.1	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4
NNW	4.4	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8

(나)지역의 경우 50m높이의 평균실측 풍속이 6.1m/s이고, 1km 이격 기준거리로 산출된 평균풍속은 5.0m/s, 3km 이격 기준거리로 산출된 평균풍속은 6.0m/s, 5km 이격 기준거리로 산출된 평균풍속은 6.6m/s, 7km 이격 기준거리로 산출된 평균풍속은 6.4m/s, 9km 이격 기준거리로 산출된 평균풍속은 7.5m/s이다.(나)지역의 방위별 실측과 보정풍속의 평균은 표 4과 같다.

표 4. (나)지역 50m 실측풍속과 기준거리별로 산출된 50m 보정풍속

방위	50m 고도의 실측 풍속[m/s]					
	실측	1km	3km	5km	7km	9km
N	2.6	2.6	2.6	2.8	3.1	4.3
NNE	3.3	3.0	3.0	3.2	3.3	4.9
NE	2.6	2.4	2.5	2.6	3.7	13.7
ENE	2.3	1.9	2.1	2.3	2.3	2.9
E	2.5	2.1	2.2	2.4	5.8	0.1
ESE	1.5	1.3	1.3	1.4	1.4	1.5
SE	5.5	5.3	5.7	6.3	5.7	5.8
SSE	7.9	7.6	8.2	9.0	8.4	8.3
S	7.4	3.9	7.7	8.1	7.9	7.7
SSW	9.9	9.0	9.1	10.6	9.3	9.4
SW	9.1	9.4	8.2	10.0	8.2	8.2
WSW	2.3	2.0	2.0	2.3	2.0	2.0
W	1.0	0.8	0.8	1.0	0.8	0.8
WNW	1.2	0.9	0.9	1.1	0.9	0.9
NW	1.5	1.1	1.4	1.3	1.4	1.3
NNW	1.9	1.7	1.9	1.9	2.0	2.3

4.2 보정풍속과 실측풍속의 오차율 비교

실측풍속대비 보정풍속의 오차율은 표5에서 표6과 같다.

표5와 같이 (가)지역은 5km이내 표본 고도를 적용하여 산출된 기하평균고도가 방위별로 0~11.76% 오차율을 나타냄으로써 본 연구에서 제안하는 기하평균고도 산출방법 중에서 가장 낮은 오차율을 나타내었다. 방위별로는 동 방위가 가장 높은 오차율을 나타내고 있으며, 동방위의 지형은 측정지점의 해발 고도보다 300m높은 산이 존재하는 지역이다.

(나)지역은 3km이내 표본 고도를 적용하여 산출된 기하평균고도가 방위별로 0~14.5% 오차율을 나타냄으로써 본 연구에서 제안하는 기하평균고도 산출방법 중에서 가장 낮은 오차율을 나타내었다. 방위별로는 북동방위의 오차율이 가장 높은 것으로 나타났다. 북동방위는 1km이격된 지점이 측정지점보다 높은 고도이며 측정지점과 1km거리이내의 지형은 'V'자형태의 단면을 하고 있다.

측정지점보다 근거리의 높은 지점이 존재하는 경우 Deacon 방정식 상 기하평균고도가 상대적으로 큰 값이 산출된다. 기하평균고도의 값과 Wind-shear는 지수관계에 있으므로 측정높이보다 높은 지점의 풍

속은 매우 높을 것으로 예상된다.

표 5. (가)지역 50m 실측풍속과 기준거리별로 산출된 50m 보정풍속 오차율

방위	50m 고도의 실측 풍속과 보정풍속의 오차율 [%]				
	1km	3km	5km	7km	9km
N	5.41	5.41	5.41	5.41	5.41
NNE	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
NE	1.82	1.82	150.9	65.45	5.45
ENE	7.41	3.70	11.11	3.70	0.00
E	-	-	-	-	-
ESE	17.65	11.76	11.76	11.76	11.76
SE	6.25	6.25	4.17	6.25	6.25
SSE	6.67	6.67	6.67	8.33	6.67
S	5.08	5.08	5.08	5.08	3.39
SSW	1.79	0.00	3.57	1.79	3.57
SW	-	-	-	-	-
WSW	35.44	5.06	10.13	29.11	6.33
W	5.17	5.17	5.17	5.17	5.17
WNW	4.17	4.17	4.17	4.17	4.17
NW	7.32	7.32	7.32	7.32	7.32
NNW	9.09	9.09	9.09	9.09	9.09

표 6. (나)지역 50m 실측풍속과 기준거리별로 산출된 50m 보정풍속 오차율

방위	50m 고도의 실측 풍속과 보정풍속의 오차율 [%]				
	1km	3km	5km	7km	9km
N	0.0	0.0	7.7	19.2	65.4
NNE	9.1	9.1	3.0	0.0	48.5
NE	7.7	3.8	0.0	42.3	426.9
ENE	17.4	8.7	0.0	0.0	26.1
E	16.0	12.0	4.0	132.0	96.0
ESE	13.3	13.3	6.7	6.7	0.0
SE	3.6	3.6	14.5	3.6	5.5
SSE	3.8	3.8	13.9	6.3	5.1
S	47.3	4.1	9.5	6.8	4.1
SSW	9.1	8.1	7.1	6.1	5.1
SW	3.3	9.9	9.9	9.9	9.9
WSW	13.0	13.0	0.0	13.0	13.0
W	20.0	20.0	0.0	20.0	20.0
WNW	25.0	25.0	8.3	25.0	25.0
NW	26.7	6.7	13.3	6.7	13.3
NNW	10.5	0.0	0.0	5.3	21.1

5. 결 론

평지에서 분포하는 풍력자원의 연직분포와 복잡지역에서 분포하는 풍력자원의 연직분포의 비교한 값은 다음과 같다.

- (1) 평지와 복잡지형에서 1km이내의 근거리
에 측정지점보다 높은 지형이 존재하는

경우 수직상 보정 오차율이 높아진다.

- (2) 평지에서는 Met mast에서 5km를 기준으로 기하평균 높이를 산출하고, 복잡지형에서는 3km를 기준으로 기하평균 높이를 산출하는 것이 바람직하다.
- (3) (가)지역의 NE방위와 WSW방위는 측정지점에서 3km이내에 존재하는 산의 영향을 받은 것으로 판단된다.
- (4) (나)지역과 같은 복잡지형에서도 Met mast보다 높은 지형이 존재하는 지역을 제외하고 Deacon 방정식 보정할 경우 오차율이 10%이내로써 신뢰할 수 있다.
- (5) 본 연구는 평지지형과 복잡지형의 표본 1개에서 추출된 데이터이므로 절대적인 값이 아니므로 보다 많은 지역에서 세분화하여 분석이 요구된다.
- (6) Met mast의 설치는 인근지역에 측정지점보다 높은 지형이 존재하는 경우를 높이 보정이 필요 없는 높이에서 계측되어지는 것이 바람직하며, Met mast 설치지점보다 높은 지형이 존재하는 경우에서 이에 대한 보정방법에 대한 연구가 필요하다.

후 기

본 논문은 한국에너지기술평가원 신재생에너지기술개발사업에 의해서 수행됨.

참 고 문 헌

1. Stern's [IPCC Report], 2007.02
2. Wind Pro2.5 User Guide book, 2006
3. 고경남, 허종철, "풍력공학입문", 문운당, 2007. 04
4. Niels - Erik Clausen, [Offshore wind Energy Technology], Risø offshore wind energy technical course, 2009
5. 정의현, 문채주, 김의선, 장영학 "복잡지형형상에 따른 풍력자원 보정에 관한 연구", 태양에너지학회 Vo.:29 No6